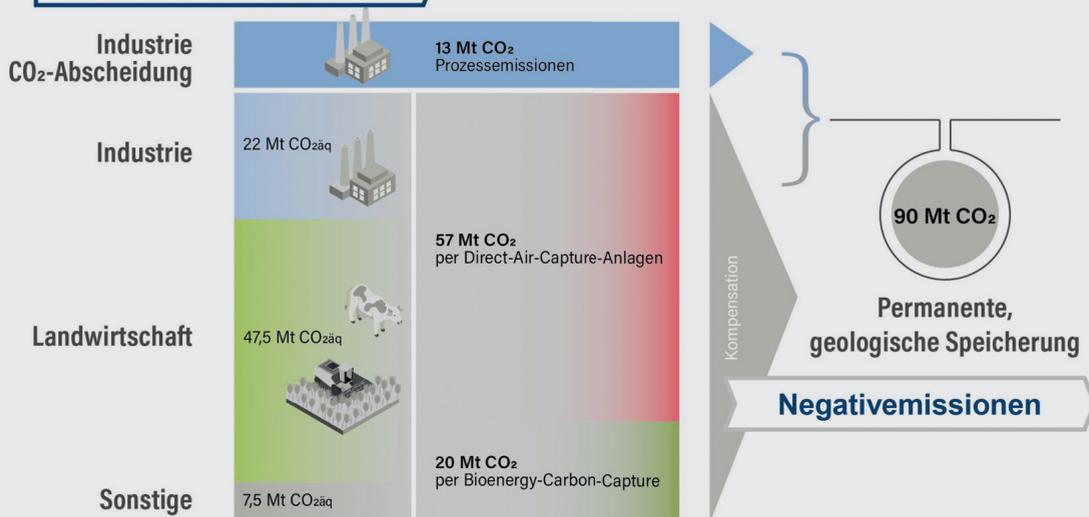


## Treibhausgasneutrales Deutschland 2045

### Restemissionen



## Modellgestützte Analyse treibhausgasneutraler Transformationsstrategien für Deutschland

Thomas Franz Schöb

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 646

ISBN 978-3-95806-789-9

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institute of Climate and Energy Systems (ICE)  
Jülicher Systemanalyse (ICE-2)

# **Modellgestützte Analyse treibhausgasneutraler Transformationsstrategien für Deutschland**

Thomas Franz Schöb

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 646

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-789-9

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	IX
Symbolverzeichnis.....	XI
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit .....	2
2 Definitionen und Status Quo.....	7
2.1 Neutralitätsziele und negative Emissionen .....	7
2.2 Treibhausgasbilanz für Deutschland .....	9
2.3 Exogene und endogene Variablen .....	12
2.4 Zusammenfassung.....	12
3 Existierende Szenarien zur deutschen Treibhausgasneutralität.....	15
3.1 Beschreibung der existierenden Szenarien .....	15
3.2 Vergleich der existierenden Szenarien .....	21
3.2.1 Verbleibende Treibhausgasemissionen und negative Emissionen .....	22
3.2.2 Endenergieverbrauch .....	24
3.2.3 Stromverbrauch.....	25
3.2.4 Stromerzeugung und installierte Kapazitäten .....	26
3.2.5 Wasserstoffbedarf und Wasserstoffbereitstellung.....	28
3.3 Zusammenfassung und Fazit .....	29
4 Methodik der Modellierung .....	33
4.1 Energiesystemmodell NESTOR .....	33
4.2 CO <sub>2</sub> -Abscheidung in Industrieprozessen, CO <sub>2</sub> -Nutzung, CO <sub>2</sub> -Transport und permanente geologische CO <sub>2</sub> -Speicherung .....	39
4.2.1 CO <sub>2</sub> -Abscheidung in Industrieprozessen .....	39
4.2.2 CO <sub>2</sub> -Nutzung in Industrieprozessen .....	43
4.2.3 CO <sub>2</sub> -Transport und permanente geologische Speicherung von CO <sub>2</sub> .....	44
4.3 CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus der Atmosphäre (DAC) .....	47
4.3.1 Hochtemperatur DAC (Absorptionsverfahren) .....	47
4.3.2 Niedertemperatur DAC (Adsorption).....	48
4.3.3 Modellierung der CO <sub>2</sub> Abscheidung aus der Umgebungsluft.....	50

---

4.4 Pfade zur Bereitstellung negativer Emissionen .....	52
4.5 Zusammenfassung .....	53
5 Szenarioannahmen und Rahmenbedingungen .....	55
5.1 Treibhausgasreduktionsziele .....	55
5.2 Exogen gesetzte Emissionspfade für Nicht-CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	58
5.3 Techno-ökonomische Rahmenbedingungen.....	59
5.4 Szenarienbaum .....	64
5.5 Zusammenfassung .....	66
6 Analyse der Transformationsstrategien hin zur deutschen Treibhausgasneutralität	67
6.1 Referenzszenario KSG2045 .....	67
6.1.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen .....	67
6.1.2 Negative Emissionen .....	70
6.1.3 Entwicklung des Primär- und Endenergieverbrauchs.....	71
6.1.4 Stromverbrauch, Stromerzeugung und installierte Kapazitäten.....	75
6.1.5 Höchstlast in einem treibhausgasneutralen Stromversorgungssystem.....	79
6.1.6 Abregelung von Windenergie- und Photovoltaikanlagen im Jahr 2045.....	82
6.1.7 Speicherbedarf und Dunkelflaute.....	84
6.1.8 Analyse der Zusammenhänge zwischen volatiler Stromerzeugung,..... flexibler Stromnachfrage und Stromspeichern .....	87
6.1.9 Wasserstoffverbrauch und -aufkommen .....	91
6.1.10 Wärmenachfrage, -bereitstellung und -speicher.....	94
6.1.11 Bioenergie .....	98
6.1.12 Industriesektor .....	100
6.1.13 Gebäudesektor .....	102
6.1.14 Verkehrssektor .....	104
6.1.15 Kosten der Transformation .....	107
6.1.16 Zusammenfassung und Diskussion .....	109
6.2 Einordnung der Ergebnisse des Referenzszenarios in die Literatur .....	115
6.2.1 Verbleibende Treibhausgasemissionen und negative Emissionen.....	116
6.2.2 Endenergieverbrauch .....	117
6.2.3 Stromverbrauch .....	119
6.2.4 Stromerzeugung und installierte Kapazitäten.....	120
6.2.5 Wasserstoffbedarf und Wasserstoffbereitstellung .....	122
6.2.6 Zusammenfassung und Diskussion .....	124
6.3 Analyseschwerpunkt: Kosten der Transformation .....	126
6.3.1 Einfluss der gewählten Vergleichsbasis auf die Transformationskosten.....	126

6.3.2 Einfluss des Zinssatzes auf die Transformationskosten .....	129
6.3.3 Investitions- und Betriebskosten der Transformation .....	132
6.3.4 Einordnung der Transformationskosten mit den erwarteten .....	
Klimaschadenskosten durch den Ausstoß von Treibhausgasen.....	136
6.3.5 Zusammenfassung und Diskussion.....	138
6.4 Analyseschwerpunkt: Wasserstoff.....	140
6.4.1 Einfluss der Wasserstoffimportkosten .....	140
6.4.2 Potenzielle Rolle von blauem Wasserstoff als Brückentechnologie .....	
auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität.....	143
6.4.3 Auswirkungen eines vollständigen Verzichts .....	
auf inländische Wasserstofferzeugung.....	151
6.4.4 Zusammenfassung und Diskussion.....	157
6.5 Analyseschwerpunkt: Treibhausgasneutralität .....	160
6.5.1 Beitrag des LULUCF-Sektors zum Erreichen der Treibhausgasneutralität	160
6.5.2 Potenzielle Rolle der unbegrenzten permanenten CO <sub>2</sub> -Speicherung .....	
in einem treibhausgasneutralen Energiesystem.....	164
6.5.3 Erreichen der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050.....	
bei identischem Treibhausgasemissionsbudget .....	171
6.5.4 Defossilisierung der chemischen Industrie .....	175
6.5.5 Beitrag von Suffizienzentwicklungen zum Erreichen .....	
der Treibhausgasneutralität.....	177
6.5.6 Zusammenfassung und Diskussion.....	181
7 Zusammenfassung.....	185
8 Anhang.....	197
8.1 Modelleingangsdaten .....	197
8.2 Weiterführende Ergebnisse .....	203
8.2.1 Weiterführende Ergebnisse zum Referenzszenario KSG2045 .....	203
8.2.2 Weiterführende Ergebnisse zum Analyseschwerpunkt: .....	
Kosten der Transformation.....	204
Abbildungsverzeichnis .....	207
Tabellenverzeichnis .....	213
Literaturverzeichnis.....	215
Danksagung .....	227

Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 646  
ISBN 978-3-95806-789-9